

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

ÉLECTROTECHNIQUE

SESSION 2020

ÉPREUVE E.4.1

Étude d'un système technique industriel
Pré-étude et modélisation

Durée : 4 heures – Coefficient : 3

Matériel autorisé

« L'usage de calculatrice avec mode examen actif est autorisé,

L'usage de calculatrice sans mémoire « type collègue » est autorisé.»

Le sujet comporte **15** pages numérotées de **1/15** à **15/15**.

Les documents réponses (pages 13 à 15) sont à remettre avec la copie.

Il sera tenu compte de la qualité de la rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul.

Les notations du texte seront scrupuleusement respectées.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20-PO EQPEM	Page 1/15

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Les Domaines Ott, producteurs de grands vins de Provence perpétuent la tradition familiale avec des pratiques rigoureuses et un savoir-faire ancestral. Les deux domaines en AOC (Appellation d'Origine Contrôlée) Côtes-de-Provence figurent parmi les 18 Crus Classés de la région (distinction datant de 1955 récompensant les vignerons). Le troisième domaine est en AOC Bandol.

En 2017, 828 000 bouteilles ont été produites et 50 % sont vendues à l'export.

S'inspirant de l'agriculture biologique, les sols sont préparés pour offrir à la vigne un terrain fertile (jachère, engrais naturels, zéro produit chimique).

Le domaine de 90 ha du Château de Selle dans le nord du département du Var a été complètement rénové en 2015.

Méthode de vinification

Après les vendanges, les raisins sont pressés et le jus est introduit dans des cuves « de débourage » dans lesquelles on ne récupère que le « jus clair ». Il est ensuite introduit dans des cuves de vinification de 80 hectolitres (80 hl correspond à 8,0 m³) ou de 120 hl. Dans ces cuves a lieu la fermentation (transformation du sucre en alcool) et le bâtonnage. Le bâtonnage est l'action de remettre en suspension les lies (levures mortes et résidus de raisins) afin d'améliorer la qualité du vin.

Cette opération était traditionnellement réalisée à l'aide d'appareils portatifs manuels ou motorisés ayant plusieurs inconvénients :

- nécessité d'ouvrir les cuves et d'introduire ces appareils, ce qui entraîne un risque de contamination et une action humaine contraignante ;
- difficulté d'avoir une remontée totale et uniforme des lies.

Bâtonnage automatique, domaines Ott

Lors de la rénovation du Château de Selle en 2015, les propriétaires ont choisi de faire installer 20 cuves de 120 hl et 28 cuves de 80 hl pour la vinification.



Figure 1 : cuves de 80 hl à gauche et de 120 hl à droite

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20-PO EQPEM	Page 2/15

Ils ont fait installer dans les cuves de 120 hl un système d'agitation (**Figure 2**) avec racleur en fond de cuve pour effectuer le bâtonnage. Le système, installé en permanence dans les cuves, permet d'éliminer les inconvénients des systèmes portatifs. Il permet également un bâtonnage plus doux pour le vin car il est effectué à vitesse très lente.

À la suite d'essais à différentes vitesses, les propriétaires ont jugé que la vitesse optimale était de $8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$. Ils souhaitent donc pouvoir agiter à une vitesse réglable entre 0 et $8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ et étendre ce système automatisé aux cuves de 80 hl.

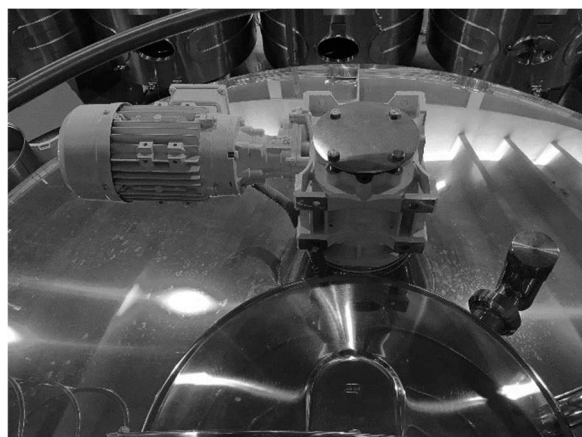
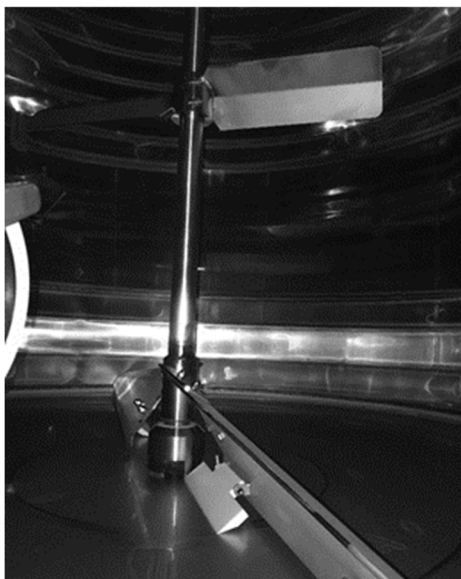


Figure 2 : Système d'agitation avec racleurs en fond de cuve sur la photo de gauche et son motoréducteur sur la photo de droite

Pilotage des cuves

La commande des systèmes de bâtonnage des cuves déjà équipées se fait sur un écran tactile, présent dans la cave, relié à un automate par un réseau MODBUS.

Afin d'améliorer et de faciliter le contrôle du process de vinification, les informations de température sont aussi reportées sur l'écran de supervision.

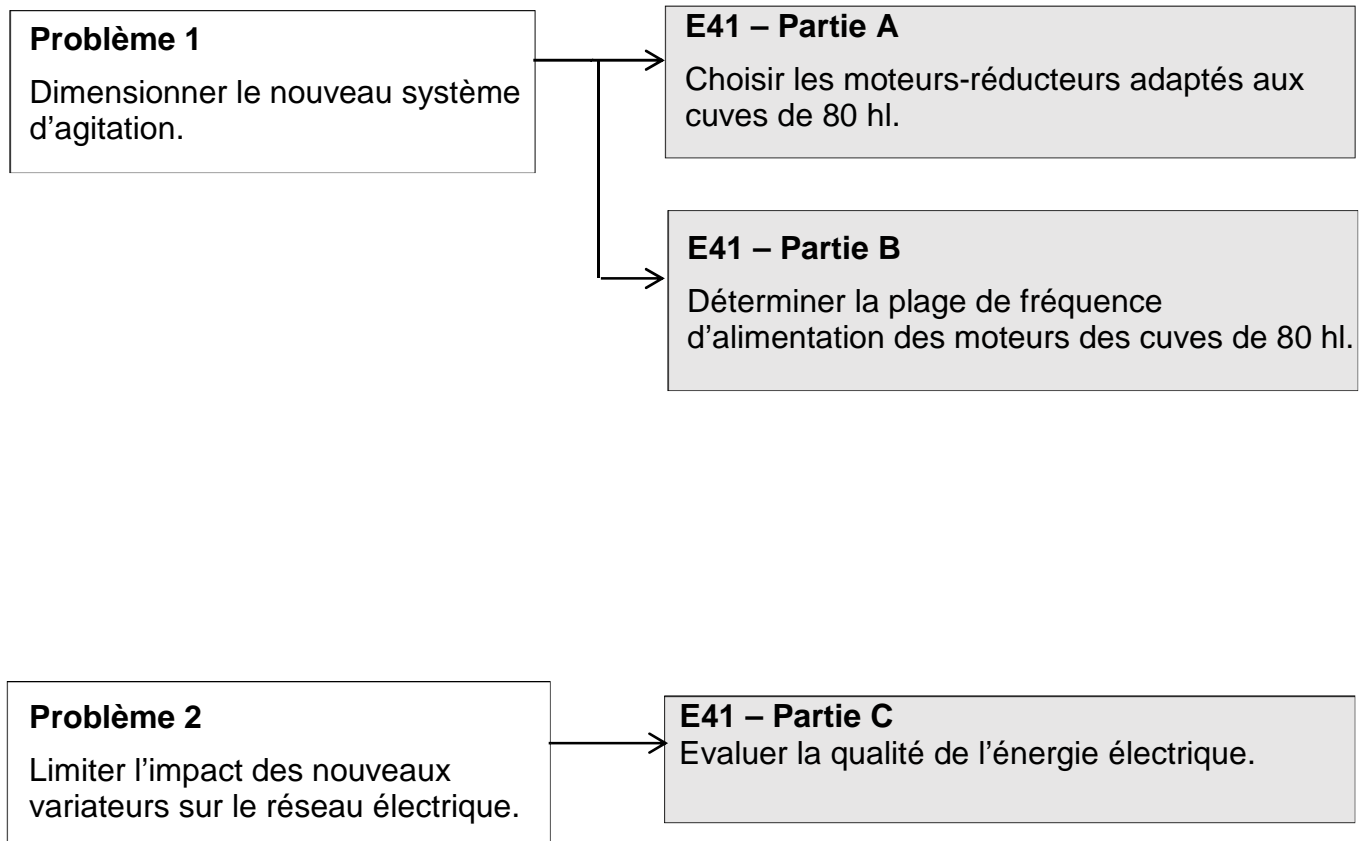
Le contrôle et la surveillance de la phase de vinification imposent une présence régulière dans la cave. Dorénavant, le maître de chai souhaite pouvoir contrôler l'évolution de la température des cuves et commander le bâtonnage du vin durant la vinification à distance. Cela nécessite donc une mise en réseau générale de tous les agitateurs et un report des informations de température sur un élément déporté (ordinateur ou téléphone).

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20-PO EQPEM	Page 3/15

Objectifs et enjeux

Le premier enjeu est d'homogénéiser la qualité du vin sur l'ensemble de la production. Pour cela, on désire étendre l'installation du système d'agitation automatisé des 20 cuves de 120 hl aux 28 cuves de 80 hl.

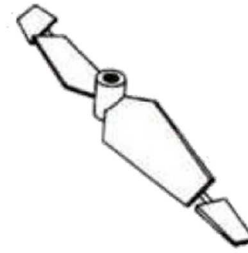
Par ailleurs, l'entreprise souhaite avoir un contrôle centralisé du processus de vinification.



PARTIE A : choisir les moteurs-réducteurs adaptés aux cuves de 80 hl

Le but de la partie A est de vérifier le bon dimensionnement de l'ensemble moteur-réducteur permettant l'agitation dans les cuves 120 hl et de voir s'il serait également adapté pour une implantation future dans les cuves de 80 hl.

L'agitation des cuves de 120 hl est réalisée avec un moteur électrique triphasé alimenté par un variateur de vitesse, un réducteur et trois hélices bipales à double flux (**Figure 3**) :



- deux hélices de diamètre 900 mm situées à 1/3 et 2/3 de la hauteur de la cuve ;
- une hélice de même diamètre que la cuve $D = 2,39$ m, située au fond.

L'hélice de fond de cuve est équipée de racleurs qui frottent sur l'acier inoxydable de la cuve.

Figure 3 : hélice bipale à double flux

Caractéristiques nominales utiles du moteur :

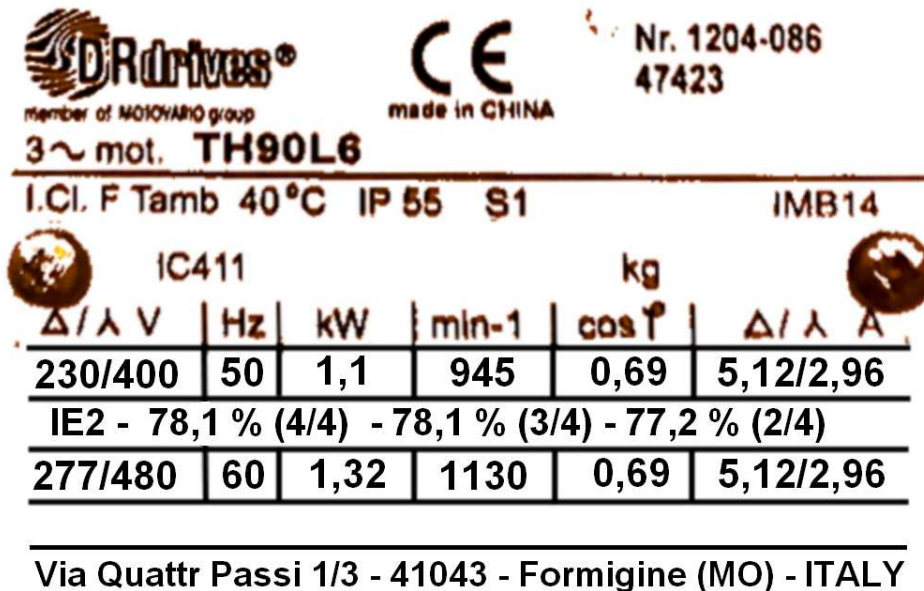


Figure 4 : plaque signalétique des moteurs utilisés pour l'agitation des cuves 120 hl

- Q1.** Pour le fonctionnement nominal et pour une alimentation à 50 Hz, relever la puissance utile P_{motN} et la vitesse de rotation n_{motN} .
- Q2.** En déduire la valeur du couple nominal du moteur T_{motN} .

Puissance utile du moteur

Le réducteur a un rendement estimé $\eta_{réd}$ de 50 %.

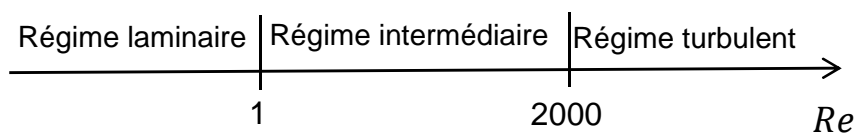
L'ensemble variateur-moteur a un rendement estimé η_{mot} de 70 %.

Des mesures ont été effectuées et ont permis de voir que le moteur et son variateur de vitesse consommaient $P_{élec} = 319 \text{ W}$ pour une agitation à $n_{agit} = 8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.

- Q3.** Calculer les puissances en sortie du moteur P_{mot} et du réducteur $P_{réd}$. Compléter la chaîne de puissance sur le **Document réponse 1 à rendre avec la copie**.

Puissance utile d'agitation

Le nombre de Reynolds Re permet de caractériser la nature du régime d'écoulement lors de l'agitation d'un fluide :



Dans le cas d'un écoulement dans une cuve agitée, Re est donné par la relation :

$$Re = \frac{D^2 \cdot n \cdot \rho}{\mu}$$

avec :

- D : diamètre de la cuve (m) ;
- n : vitesse d'agitation ($\text{tr}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- ρ : masse volumique du fluide ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
- μ : viscosité du fluide ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

La puissance P_{agit} absorbée par le fluide pour l'agiter peut être déterminée par la relation valable en régime turbulent :

$$P_{agit} = Np \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

avec :

- P_{agit} : puissance (en W) ;
- ρ : masse volumique du fluide (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
- n : vitesse de l'agitation (en $\text{tr}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- Np : nombre de puissance ;
- d : diamètre de l'hélice (en m).

Le nombre de puissance Np dépend du type d'hélice utilisée et du nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement selon l'abaque donné en **Annexe 1**.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20-PO EQPEM	Page 6/15

On donne :

- viscosité du vin à 20°C : $\mu = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$;
- masse volumique du vin à 20°C : $\rho = 990 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- vitesse d'agitation maximale : $n = 8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.

Q4. Calculer le nombre de Reynolds Re dans une cuve de 120 hl pour agiter le vin à la vitesse maximale et montrer que le régime est turbulent.

On prendra $Re = 4 \cdot 10^5$ pour la suite du sujet.

Q5. À l'aide de l'abaque de l'**Annexe 1**, déterminer le nombre de puissance Np associé à cette agitation pour des hélices bipale à double flux.

Q6. Montrer que la puissance mécanique fournie par l'ensemble des trois hélices à la vitesse de $8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ est d'environ $P_{agit} = 70 \text{ W}$.

Q7. En déduire la valeur du rendement $\eta_{hél}$ du système hélices avec racleurs.

Validation pour les cuves de 80 hl

Les fabricants des cuves ont prévu d'utiliser les mêmes moteurs-réducteurs pour une introduction future dans les cuves de 80 hl.

Les caractéristiques de la petite cuve et des hélices permettent de calculer la nouvelle valeur de la puissance d'agitation à la vitesse de $8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$: **$P_{agit} = 24 \text{ W}$** .

Les valeurs des rendements sont : $\eta_{mot} = 0,70$; $\eta_{réd} = 0,50$; $\eta_{hél} = 0,65$.

Q8. En déduire, à l'aide des rendements, la puissance en sortie du réducteur $P_{réd}$ et la puissance utile du moteur P_{mot} . Compléter ces valeurs sur le **Document réponse 2 à rendre avec la copie**.

Le réducteur a un rapport de réduction $r_{réd} = 100$ et on rappelle que les hélices tournent à la vitesse de $8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.

Q9. Calculer la vitesse du moteur n_{mot} en $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$ et Ω_{mot} en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$. Compléter ces valeurs sur le **Document réponse 2**.

Q10. En déduire le moment du couple T_{mot} que le moteur doit être capable de fournir.

Q11. Conclure quant au choix d'utiliser les mêmes moteurs-réducteurs.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20-PO EQPEM	Page 7/15

Partie B : déterminer la plage de fréquences d'alimentation des moteurs pour les cuves de 80 hl

Les caractéristiques du moteur référence 80A6 retenu pour les cuves de 80 hl sont données ci-dessous.

P_n [kW]	Taglia Size Taille Größe Tamaño 规格	n_n [rpm]	I_n 400 V [A]	M_n [Nm]	$\eta\%$ (4/4)	$\eta\%$ (3/4)	$\cos\varphi_n$
0,37	80A6	940	1,18	3,8	66,3	64,0	0,68

Figure 5 : caractéristiques du moteur 80A6 alimenté à 50 HZ

Le maître de chai souhaite une vitesse n_{agit} réglable entre 0 et 8,0 tr·min⁻¹. C'est pourquoi, on utilise des variateurs de vitesse travaillant à $\frac{U}{f} = \text{constante}$. On souhaite déterminer les réglages des variateurs.

- Q12.** Relever la vitesse nominale n_{motN} et le moment du couple utile nominal T_{motN} du moteur 80A6 puis positionner le point de fonctionnement nominal **A** du moteur sur le **Document réponse 3 à rendre avec la copie**.
- Q13.** Déterminer la vitesse de synchronisme n_s et le nombre de paires de pôles p du moteur.
- Q14.** Positionner le point de synchronisme et tracer sur le **Document réponse 3** la caractéristique mécanique du moteur alimenté à 50 Hz.

À la fréquence $f = 50$ Hz, on a mesuré la valeur efficace de la tension simple : $V = 240$ V.

- Q15.** Calculer la valeur efficace de la tension composée U correspondante.
- Q16.** Calculer la valeur du rapport $\frac{U}{f}$ à $f = 50$ Hz.

Avec un réducteur de rapport de réduction $r_{red} = 100$, le moteur doit tourner à $n_{mot} = 800$ tr·min⁻¹ pour que l'agitation se fasse à $n_{agit} = 8,0$ tr·min⁻¹.

- Q17.** Placer sur le **Document réponse 3** le point **B** correspondant au fonctionnement à cette vitesse avec un couple moteur $T_{mot} = 1$ N·m. Puis tracer la caractéristique mécanique du moteur pour ce réglage du variateur.
- Q18.** Dédire de cette caractéristique mécanique la vitesse de synchronisme n_s' , la fréquence f' et la valeur efficace de la tension composée U_{mot}' d'alimentation du moteur pour ce réglage du variateur.
- Q19.** Déterminer la plage de fréquence des tensions fournies par le variateur au moteur.

Partie C : évaluer la qualité de l'énergie électrique

L'arrêté du 17 mars 2003 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement au réseau public de distribution d'une installation de consommation d'énergie électrique fixe des limites pour les courants harmoniques injectés sur le réseau.

Harmoniques : Le gestionnaire d'une installation de consommation de puissance souscrite supérieure à 100 kVA doit limiter les courants harmoniques injectés sur ce réseau.

Les limites sont déterminées au prorata de la puissance souscrite S_{ref} .

À chaque harmonique de rang n est associé un coefficient de limitation K_n .

Le gestionnaire de l'installation doit limiter ses courants harmoniques I_{Hn} à la valeur :

$$I_{Hn} = K_n \cdot I_{ref}$$

(I_{ref} correspondant au courant de ligne à la puissance souscrite S_{ref})

Le tableau ci-dessous donne la valeur de K_n en fonction du rang n de l'harmonique :

Rangs impairs	K_n (%)	Rangs pairs	K_n (%)
3	4,0	2	2,0
5 et 7	5,0	4	1,0
9 et > 13	2,0	> 4	0,5
11 et 13	3,0		

Figure 6 : coefficient de limitation pour chaque harmonique

Le domaine a une puissance souscrite $S_{ref} = 422$ kVA et est connecté à un réseau triphasé dont la valeur efficace de la tension simple a été mesurée à 240 V.

Q20. Montrer que la valeur efficace de l'intensité du courant I_{ref} correspondant à la puissance souscrite S_{ref} est $I_{ref} = 586$ A.

Q21. Calculer, à l'aide de cette valeur et des pourcentages donnés **Figure 6**, les valeurs efficaces maximales autorisées des courants harmoniques. Reporter ces valeurs sur le **Document réponse 4 à rendre avec la copie**.

On donne en **Annexe 2** le relevé de la forme d'onde de la tension et de l'intensité du courant appelé par le variateur de vitesse pour une vitesse d'agitation $n_{agit} = 8,0$ tr·min⁻¹ ; et en **Annexe 3** la représentation spectrale de l'intensité du courant appelé par la phase 1.

Q22. Commenter l'importance des harmoniques de rangs multiples de 3.

Les premiers harmoniques à surveiller pour respecter cet arrêté sont ceux de rang 5, 7, 11 et 13.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20-PO EQPEM	Page 9/15

On donne en **Annexe 4** l'écran « puissances » d'un analyseur de réseau triphasé branché sur un variateur de vitesse pour une vitesse d'agitation $n_{agit} = 8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.

- Q23.** À partir de l'annexe 4, montrer que la valeur efficace du fondamental du courant dans la phase 1 est $I_{1f} = 0,47 \text{ A}$.
- Q24.** Utiliser cette valeur I_{1f} et la représentation spectrale de l'intensité du courant appelé par la phase 1 donnée en **Annexe 3** pour calculer les valeurs efficaces des harmoniques à surveiller pour respecter cet arrêté. Compléter la colonne « I_{Hn} pour un variateur » sur le **Document réponse 5 à rendre avec la copie** (calculs et résultats).

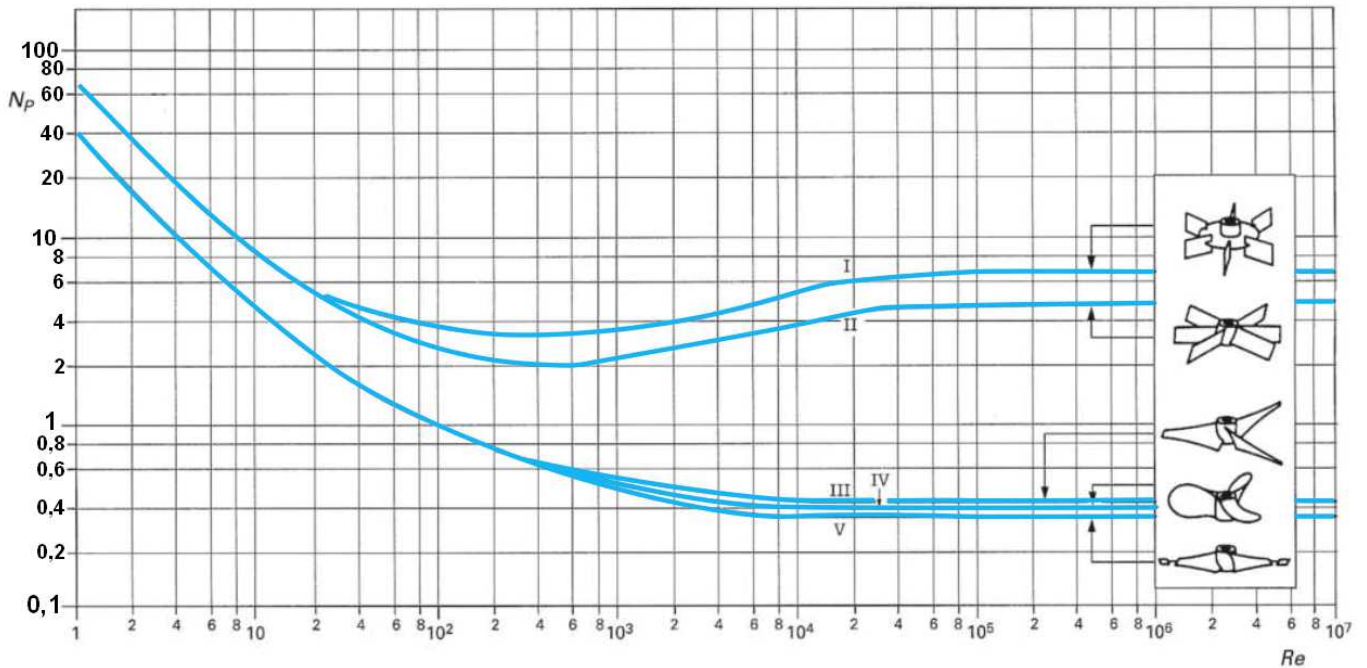
Après équipement de toutes les cuves, 48 variateurs seront commandés pour une utilisation simultanée. Dans le cas le plus défavorable, on admet que les courants de même fréquence sur une ligne sont en phase et que leurs valeurs efficaces s'additionnent.

- Q25.** Calculer les valeurs efficaces des harmoniques générés lorsque les 48 variateurs fonctionneront simultanément. Compléter la colonne « I_{Hn} pour 48 variateurs » du **Document réponse 5**.
- Q26.** Comparer ces valeurs aux valeurs maximales autorisées par l'arrêté du 17 mars 2003. Conclure sur le respect de l'arrêté et faire d'éventuelles propositions.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20-PO EQPEM	Page 10/15

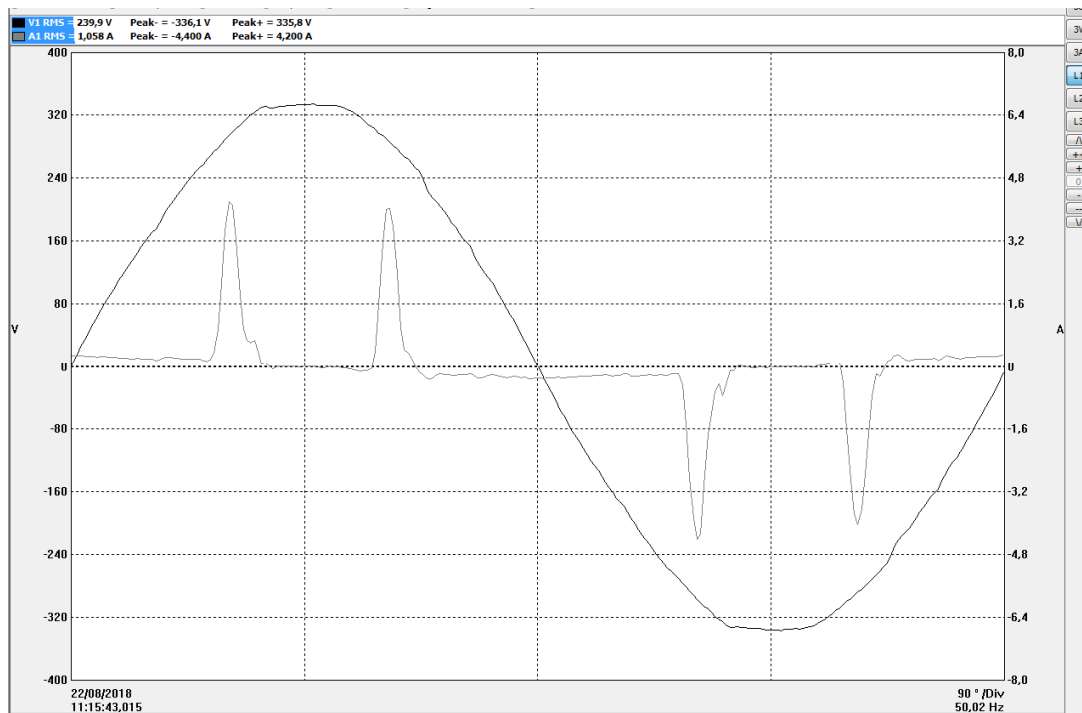
Annexe 1 :

Évolution du nombre de puissance N_p en fonction du nombre de Reynolds Re pour différentes hélices.



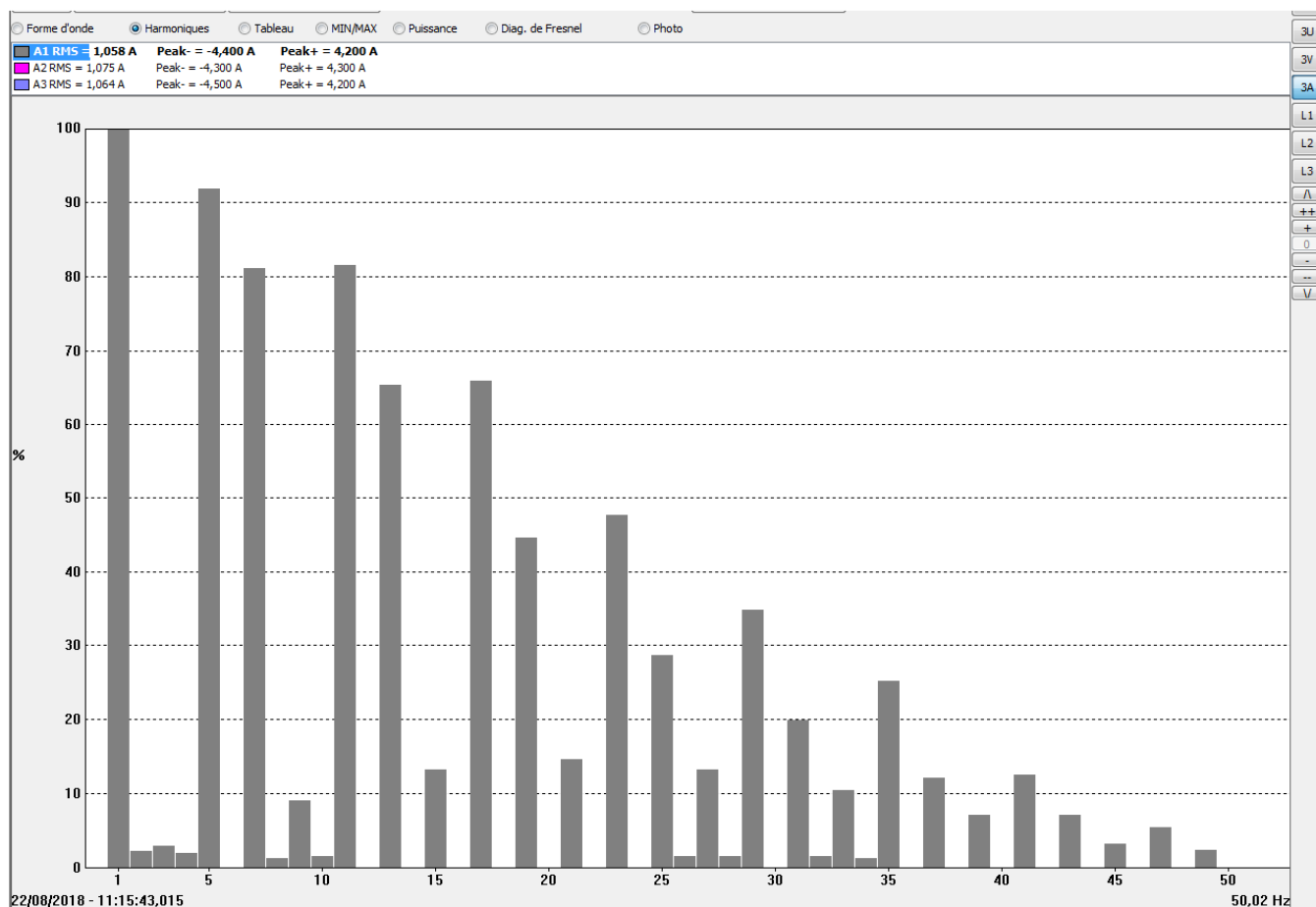
Annexe 2 :

Écran « forme d'onde » d'un analyseur de réseau : tension simple et courant entrant sur la phase 1 d'un variateur de vitesse pour une vitesse de $8,0 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.



Annexe 3 :

Écran « harmoniques » d'un analyseur de réseau : représentation spectrale en pourcentage du fondamental du courant entrant sur la phase 1 du variateur de vitesse pour une vitesse de 8,0 tr·min⁻¹.



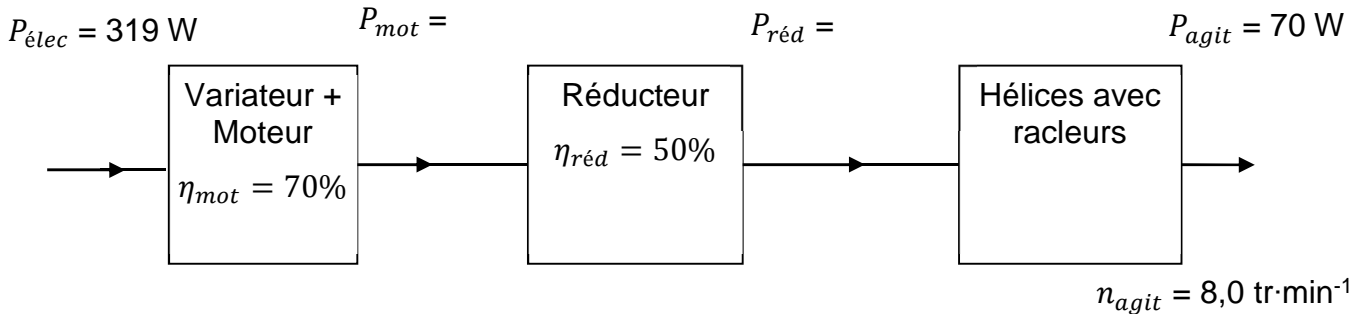
Annexe 4 :

Écran « puissances » d'un analyseur de réseau branché sur un variateur de vitesse pour une vitesse de 8,0 tr·min⁻¹.

Voie	W	var	VA	PF	DPF	Tan
L1	105	-42	250	0,421	0,929	-0,399
L2	105	-38	249	0,422	0,941	-0,36
L3	108	-42	252	0,429	0,932	-0,389
Total	319	-121	751	0,424	0,934	-0,382

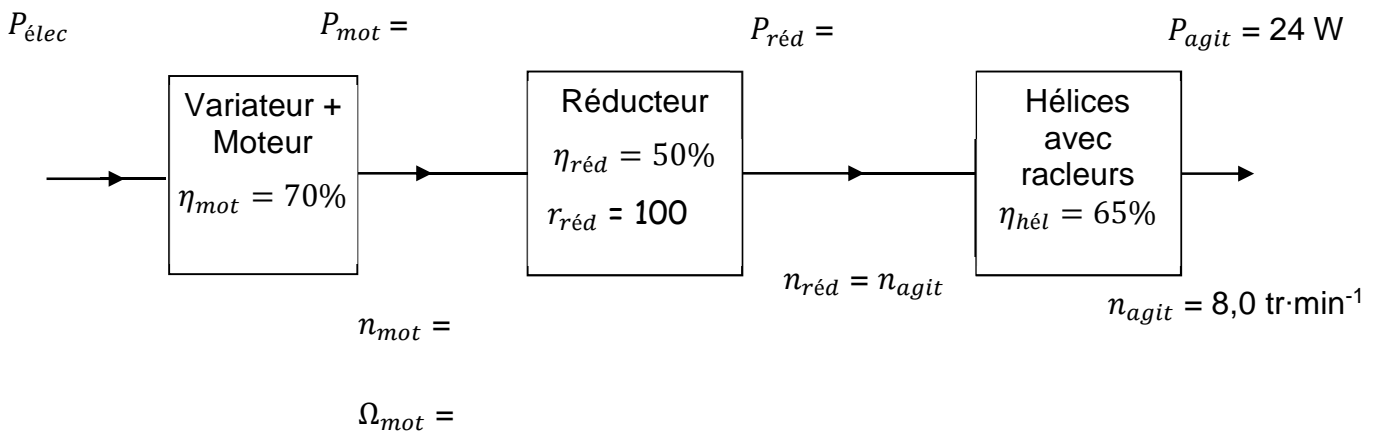
Document réponse 1

Bilan des puissances et des vitesses pour l'agitation dans les cuves de 120 hl

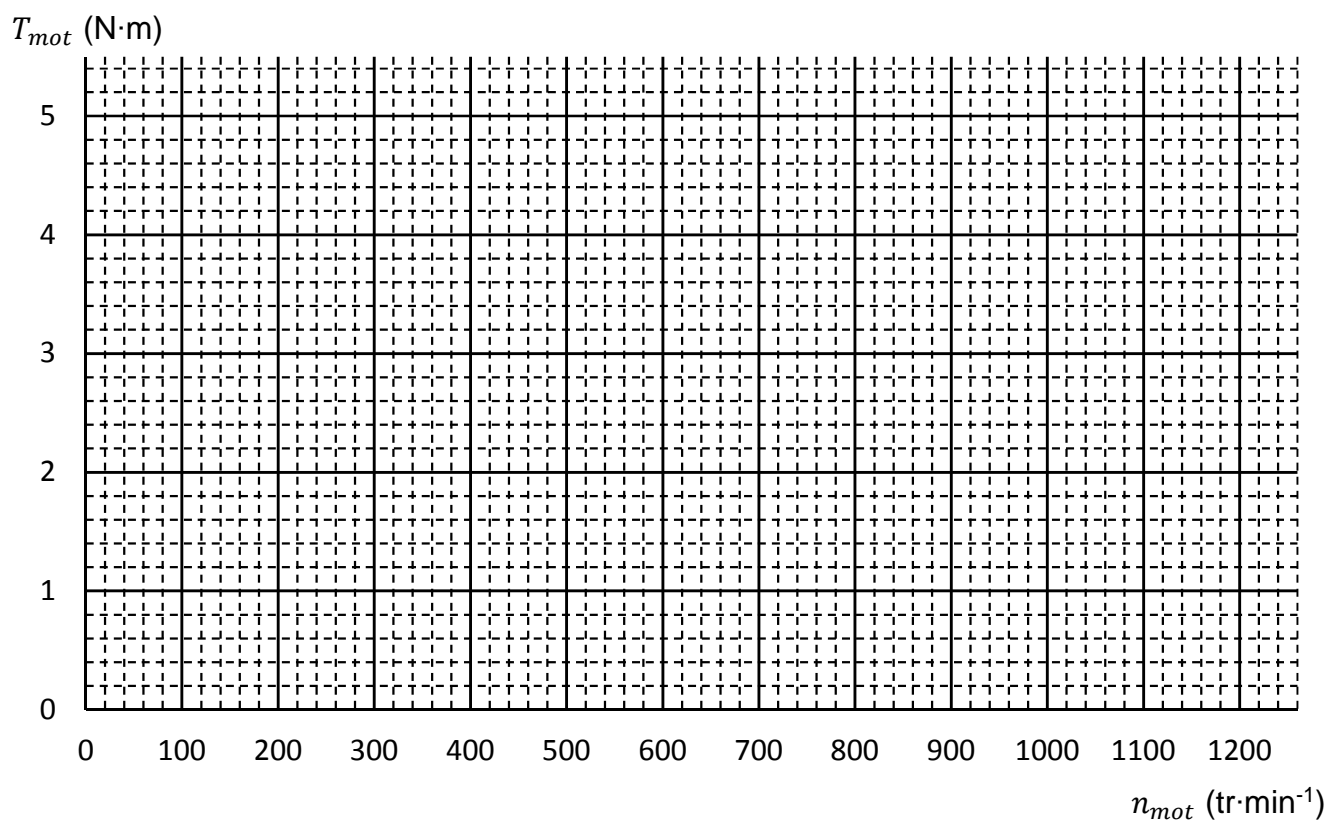


Document réponse 2

Bilan des puissances et des vitesses pour l'agitation dans les cuves de 80 hl



Document réponse 3 :
Caractéristiques mécaniques du moteur
avec et sans variateur de vitesse



Document réponse 4 :

Valeurs efficaces maximales autorisées pour les harmoniques

Rangs impairs	K_n (%)	I_{Hn} maximum	Rangs pairs	K_n (%)	I_{Hn} maximum
3	4,0		2	2,0	12 A
5 et 7	5,0		4	1,0	6 A
9 et > 13	2,0		> 4	0,5	3 A
11 et 13	3,0	18 A			

Document réponse 5 :

Valeurs efficaces des harmoniques les plus importants pour un puis pour 48 variateurs permettant une agitation à 8,0 tr·min⁻¹

Rang de l'harmonique	I_{Hn} pour un variateur	I_{Hn} pour 48 variateurs
5		
7		
11	0,39 A	19 A
13	0,31 A	15 A